

# 移動エントロピーによる因果関係の発見と これに基づく共同注意の獲得

Acquisition of joint attention based on causality detection by using transfer entropy

住岡 英信 (科学技術振興機構 ERATO, 阪大院)

正 吉川 雄一郎 (科学技術振興機構 ERATO) 正 浅田 稔 (科学技術振興機構 ERATO, 阪大院)  
Hidenobu SUMIOKA, JST ERATO, Graduate School of Eng., Osaka University, sumioka@jeap.org  
Yuichiro YOSHIKAWA, JST ERATO  
Minoru ASADA, JST ERATO, Graduate School of Eng., Osaka University

*Joint attention*, that is a behavior to attend to the object that the other gazes at, is an important ability not only for human-human communication but also for human-robot communication. Previous works have proposed mechanisms to acquire joint attention based on the causal structure about face patterns and own gaze shift. However, a robot needs to know which pairs of states and actions it should focus on to acquire joint attention. The robot needs to detect the causality among the previous observation, the action, and the current observation. In this paper, we focus on the transfer entropy that indicates the influence of a state and an action on an experience. We calculate transfer entropies in face-to-face interaction and show that a robot can find the pair that includes the causal structure and that the robot can acquire joint attention based on the pair.

**Key Words:** joint attention, transfer entropy, contingency learning

## 1 はじめに

近年、コミュニケーションの基礎として共同注意と呼ばれる行動が注目されている。共同注意は相手の見ているものを見ることと定義され、この行動を通じて相手の視線についての理解を深めることで、乳児は他者理解の能力といったより複雑なコミュニケーションに必要な社会的認知能力を獲得していくと言われている [1]。共同注意は人-ロボット間のスムーズなコミュニケーションのためにも重要であることが指摘されている。従来研究では共同注意の能力はあらかじめプログラムされることが多かった(例えば、文献 [2]) が、これを実施するタイミングなども含めて考えると、適切に共同注意を達成するためのメカニズム・パラメータは個人にさえ依存する可能性があり、あらかじめ最適化しておくことは困難であると考えられるため、ロボットが自律的に獲得・適応可能であることが望ましい。一方、ヒトの乳児も、周りの人とのインタラクションを通じて共同注意の能力を獲得すると考えられるが、その発達過程は明らかでない。人とのインタラクションを通じ共同注意を獲得するロボットの研究は、適応的な共同注意能力を有するロボットの実現のみならず、さらには乳児の発達メカニズム解明のための構成論的アプローチとしても興味深い [3]。

インタラクションを通じた共同注意獲得過程の構成論的モデル化を扱った研究として、随伴性の学習に注目した研究がある [4, 5]。養育者の視線の先には、乳児にとっても興味深いものがある傾向があると考えられる。これらの従来研究では、対面インタラクションにおいてはこのような因果性が存在することを指摘し、ロボットがある行為によって視覚的に顕著な物体を発見したとき、行為の直前に観測していた人の顔の見え方とその行為を連合することで、人の顔の見ている方向を見る行動すなわち共同注意を獲得可能であることを示した。しかしこれらの研究では、相手の顔の見え方と視覚的に顕著な物体を発見する行為との間に

因果性があること自体をどのように発見するか、という点については考慮されていなかった。人の生活環境のような場における多自由度・多感覚様式を備えるロボットを想定すると、どの行為や感覚の間に因果性が存在するのかをあらかじめ規定しておくことは一般に容易ではなく、ロボット自身が経験から、どのような変数の間に因果性が存在するのかを自律的に発見できることが望ましい。

そこで本研究では、時間的な情報の流れが存在する確率変数間の依存関係を示す情報量である移動エントロピー [6] に注目し、ある時刻での観測および行為と、次の時刻での観測の間の因果関係を移動エントロピーによって測ることを考える。ロボットと人との対面インタラクション場面の計算機シミュレーションにおいて、インタラクションを通じて得られた経験から移動エントロピーを計算することで、因果的である変数の組み合わせとして、共同注意の随伴性学習に必要な行為と観測の変数を発見可能であることを示す。

本論文ではまず従来研究における共同注意学習メカニズムの一つである随伴性学習 [4] について述べ、本研究で発見すべき因果関係について述べる。次に本論文において扱う対面インタラクションについて述べ、そのインタラクションにおける因果関係を測る指標として利用する移動エントロピーについて説明する。最後にシミュレーションの結果、移動エントロピーによって共同注意を学習可能な状態と行動の組合せを発見できることを示す。

## 2 随伴性学習 [4]

本節では Nagai *et al.* が提案した随伴性学習 [4] とそれがどのような因果関係に着目していたのかについて説明する。Figure 1 は Nagai *et al.* において学習されていた関係について示した図である。Nagai *et al.* は対面インタラクション場面では養育者には乳児の興味のある対象物をしばしば注視する傾向があるためロボットが養育者の顔の向き

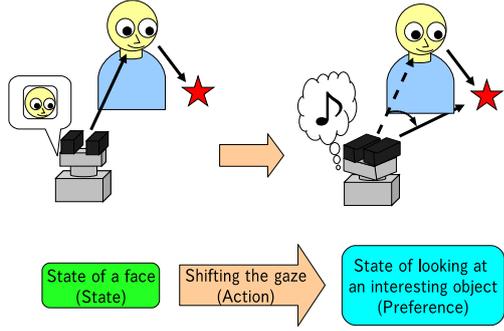


Fig.1 The mechanism of contingency learning about joint attention

に従って視線を切替えれば、興味のある対象を見るという事象が付随することに注目した。この因果関係を利用し、ロボットに顔から対象物への視線切替えにおいて顔の状態と対象物への視線切替え行動を対象物注視の成否に基づいて自身で評価させることで、人からの明示的な教示を必要とせず共同注意を獲得させることができることを示した。

この研究においては注目されていた因果関係は顔の向きと自身の視線切替えと興味のある対象物を注視できたかどうかであり、これらはそれぞれ環境に関する状態、自身の行動、自身の持つ選好性に関する変数であると考えられる。そのため本研究では対面インタラクションにおいて自身の選好性に対して強い因果関係のある環境の状態、自身の行動の組合せをロボット自身に自律的に発見させることを目指す。

### 3 問題設定

本研究で扱う対面インタラクションのシミュレーションの概要を Figure 2 に示す。ロボットモデルと養育者モデルは正対しており、その位置は変わらない。両者の間にはテーブルが存在し、それは  $N$  個の場所に量子化され、それぞれに 1 から  $N$  までの番号がふられている。そのうちのいずれかに  $M$  個のそれぞれ識別可能な対象物が重複を許さずに配置されている。

この環境において養育者とロボットは養育者、ロボットの順に交互に行動する。以下では養育者の行動開始直前からロボットの行動直後までを 1 ステップとする。

本論文では行動として視線切替えと発声の 2 つを考える。視線切替え  $A_{head}$  とはある確率分布に従ってテーブル上の番号のついた位置、もしくは相手に視線を向けることを指す。発話  $A_{voice}$  は対象物を注視しているときに、ある確率  $p_v$  で発声することを意味する。 $t$  回目のステップでの視線切替え行動  $a_{head,t}$  と発声行動  $a_{voice,t}$  はそれぞれ

$$a_{head,t} \in A_{head} = \{0, 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^N p(a_{head,t} = i) = 1$$

$$a_{voice,t} \in A_{voice} = \{0, 1\} \quad (2)$$

$$(p(a_{voice,t} = 1), p(a_{voice,t} = 0)) = \begin{cases} (p_v, 1 - p_v) & \text{if looking at an object} \\ (0, 1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで  $a_{head,t} = 0$  は相手の顔へ視線を向けたことを指し、 $a_{voice,t} = 1$  は発声したことを、 $a_{voice,t} = 0$  は発声しなかったことを指す。

インタラクション中、 $T_{change}$  ステップ毎に対象物の配置を変更する。但し、養育者またはロボットが注視している位置の状態を変化させないように配置する。つまりいずれかの注視している位置に対象物がある場合はそれを動かさず、対象物がない場合はその位置に対象物を配置しない。以下ではそれぞれのモデルの行動について、その詳細を述べる。

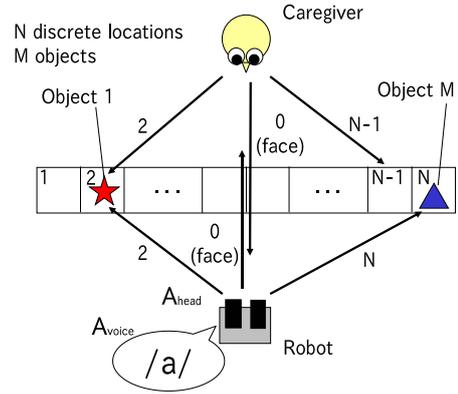


Fig.2 Overview of caregiver-robot interaction.

#### 3.1 養育者モデル

養育者は自身の行動フェーズに視線切替えのみを行う。本論文では養育者は発声は行わない。養育者はロボットもしくはいずれかの対象物へと視線を向ける。その視線切替えはランダムに、あるいはロボットの視線に応答的に、またはロボットの視線を自身の見ていた対象物へと誘導するように行われる。

養育者はまず現在注視している対象を知覚する。もしそれがロボットの顔であった場合は確率  $p_{RJA}$  で応答的視線切替え (RJA process) を行い、そうでない場合は  $p_{rnd}^C$  でロボットへ、 $1 - p_{rnd}^C$  で  $M$  個の対象物のうちいずれかへと視線を向ける。ここで応答的視線切替えとはロボットが対象物を注視している場合、養育者はロボットの見ていた対象物へ視線を向けると言う行動を指す。

対象物を注視していた場合、養育者は確率  $p_{IJA}$  で誘導的視線切替え (IJA process) を行い、そうでない場合は、先程同様、 $p_{rnd}^C$  でロボットへ、 $1 - p_{rnd}^C$  で対象物のうちいずれかへと視線を向ける。誘導的視線切替え (IJA process) を選択した場合、養育者はまずロボットの方へ視線を向け、次のステップで以前見ていた対象物へ再び視線を向ける。

#### 3.2 ロボットモデル

各ステップにおいてロボットはまず養育者の顔の向き  $S_{face}^R$  と対象物の名前  $S_{object}^R$  を観測する。 $t$  回目のステップにおける養育者の顔の向き  $s_{face,t}^R$  は

$$s_{face,t}^R \in S_{face}^R = \{0, 1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^N p(s_{face,t}^R = i) = 1$$

である。ここで  $S_{face}^R$  の各要素はロボットの視線切替え  $A_{head}^R$  の各要素に対応している。つまり、 $s_{face,t}^R = 1$  は養

育者がテーブル上の1番位置を注視していることを表しており、養育者と共同注意を行うためのロボットの視線切替えは  $a_{head,t}^R = 1$  である。また、 $t$  回目のステップにおいて注視している対象物の名前  $s_{object,t}^R$  は

$$s_{object,t}^R \in S_{object}^R = \{0, 1, 2, \dots, M\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^M p(s_{object,t}^R = i) = 1$$

である。但し、 $s_{object,t}^R = 0$  はテーブル上の対象物の配置されていない場所を見たことを表す。

本研究ではロボットの視野は狭く、養育者の顔と対象物を同時に見ることはできないとした。そのため、 $S_{face}^R, S_{object}^R$  は一方を注視しているとき、他方の状態はランダムに決定される。例えば  $t$  ステップにおいて対象物1を注視している場合、 $s_{object,t}^R = 1$  だが  $s_{face,t}^R$  については状態はランダムに決定される。

また、乳児が養育者の正面顔や複雑な対象物に興味を持つという知見 [7] に従い、ロボットは正面顔あるいは対象物についての選好性  $I_{front}^R, I_{object}^R$  を持つ。 $t$  ステップにおけるそれぞれの状態  $i_{front,t}^R, i_{object,t}^R$  は

$$i_{front,t}^R \in I_{front}^R = \{0, 1\} \quad (5)$$

$$i_{object,t}^R \in I_{object}^R = \{0, 1\} \quad (6)$$

である。但し  $i_{front,t}^R = 1$  となるのは養育者の顔を注視しており、かつその顔がロボットを向いている時であり、 $i_{object,t}^R = 1$  となるのは対象物を注視している時である。

現在のステップでの観察を終えると、ロボットは確率  $p_{rnd}^R$  で養育者へ、 $1 - p_{rnd}^R$  で  $N$  個の場所のうちいずれかへと視線切替え  $A_{head}^R$  を行う。養育者が常に相手の顔または対象物を見るのに対してロボットは対象物のない位置も見ることがあることに注意されたい。さらに対象物を見ているときにはロボットは確率  $p_{voice}^R$  で発声  $A_{voice}^R$  を行う。

本研究においては、ロボットの発声に対して養育者は反応しないとしたため、発声行動  $a_{voice,t}^R$  と状態  $s_{face,t}^R, s_{object,t}^R$  との組合せは次のステップにおける正面顔や対象物について選好性  $i_{front,t+1}^R, i_{object,t+1}^R$  と独立であると考えられる。一方、従来研究 [4, 5] 同様、養育者の視線の先には常に対象物が存在するため、次のステップの対象物についての選好性  $i_{object,t+1}^R$  は現在の養育者の顔の向き  $s_{face,t}^R$  とロボットの視線切替え行動  $a_{head,t}^R$  に従属であり、共同注意を獲得するためにロボットに期待するのは  $I_{object}^R$  に対して  $S_{face}^R, A_{head}^R$  の組合せを発見することである。

## 4 移動エントロピー

選好性と状態、行動との間の因果関係を測定するために、本研究では移動エントロピー [6] を利用する。移動エントロピーは情報量の種類であり、確率変数間の情報の流れを平均情報量として数値化したものである。変数間の相関のみを示し情報の流れを含まない相互情報量とは異なり、移動エントロピーは情報の流れを抽出することができ、変数間の因果関係を測る指標としてロボティクスの分野でも応用が期待されている [8]。

時刻  $t$  における確率変数  $X, Y$  の要素を  $x_t, y_t$  とする。 $X$  に対する  $Y$  の影響を表す移動エントロピー  $T_{Y \rightarrow X}$  は

$$T_{Y \rightarrow X} = \sum_{x_{t+1}, x_t \in X} \sum_{y_t \in Y} p(x_{t+1}, x_t, y_t) \log \frac{p(x_{t+1}|x_t, y_t)}{p(x_{t+1}|x_t)} \quad (7)$$

で計算される。これは  $X$  がマルコフ性を有すると仮定したときの確率分布と  $Y$  に従属であるとしたときの確率分布との間の Kullback-Leibler 情報量に等しい。

本研究においては選好性変数  $I_k^R$  に対する状態変数  $S_l^R$  と行動変数  $A_m^R$  の移動エントロピー  $T_{A_m^R, S_l^R \rightarrow I_k^R}$  を考える。すなわち

$$T_{A_m^R, S_l^R \rightarrow I_k^R} = \sum_{\substack{i_{k,t+1}^R, i_{k,t}^R \in I_k^R \\ s_{l,t}^R \in S_l^R \\ a_{m,t}^R \in A_m^R}} p(i_{k,t+1}^R, i_{k,t}^R, s_{l,t}^R, a_{m,t}^R) \log \frac{p(i_{k,t+1}^R | i_{k,t}^R, s_{l,t}^R, a_{m,t}^R)}{p(i_{k,t+1}^R | i_{k,t}^R)} \quad (8)$$

$$k = \{front, object\}, \quad l = \{face, object\}$$

$$m = \{head, voice\}$$

である。

式 (8) で求めた移動エントロピーには、状態と行動の組合せと選好性との間の因果関係の影響だけでなく、行動のみと選好性との間の因果関係の影響も含まれる。そこで本研究では  $T_{A_m^R, S_l^R \rightarrow I_k^R}$  から、状態  $I_k^R$  に対する行動  $A_m^R$  の移動エントロピー  $T_{A_m^R \rightarrow I_k^R}$  を除いた値

$$TE_{m,l,k} = T_{A_m^R, S_l^R \rightarrow I_k^R} - T_{A_m^R \rightarrow I_k^R} \quad (9)$$

$$= \sum_{\substack{i_{k,t+1}^R, i_{k,t}^R \in I_k^R \\ s_{l,t}^R \in S_l^R \\ a_{m,t}^R \in A_m^R}} p(i_{k,t+1}^R, i_{k,t}^R, s_{l,t}^R, a_{m,t}^R) \log \frac{p(i_{k,t+1}^R | i_{k,t}^R, s_{l,t}^R, a_{m,t}^R)}{p(i_{k,t+1}^R | i_{k,t}^R, a_{m,t}^R)} \quad (10)$$

を因果度とし、変数間の因果関係を示す指標とする。これは  $I_k^R$  は  $A_m^R$  に従属であると仮定した場合の確率分布と  $S_l^R, A_m^R$  に従属であると仮定した場合の確率分布との間の Kullback-Leibler 情報量に等しい。

## 5 実験

### 5.1 実験設定

対面インタラクションにおいてどのような組合せが選好性に対して強い因果を示すかを調べるために、養育者モデルとロボットモデルに対面インタラクションを行わせた。移動エントロピーを計算するためには変数の各組合せにおける確率分布を推定する必要がある。そのため、各ステップ毎に経験した各変数の要素の組合せを記録し、それぞれの出現頻度からその各組合せにおける確率分布を計算し、それに基づいて各組合せの因果度を計算した。

実験においてはシミュレーション上の環境の量子数は  $N = 10$  とし、対象物の数は  $M = 4$  とした。これより、養育者とロボットの相手を見る確率はそれぞれ  $p_{rnd}^C = 0.20, p_{rnd}^R \approx 0.09$  である。対象物の配置変更は  $T_{change} = 4$  で行った。その他のパラメータは  $p_{RJA} = 0.80, p_{IJA} = 0.20, p_{voice}^R = 0.8$  とした。

シミュレーションは全ての組合せ ( $2 \times 2 \times 2 = 8$  通り) に対して各ステップ間の因果度の変化量の絶対値が定数  $\theta$  よりも小さい場合に終了とした。ここでは  $\theta = 1.0 \times 10^{-8}$  とした。

### 5.2 対面インタラクションにおける移動エントロピーと共同注意の獲得

対面インタラクションにおけるそれぞれの選好性に対する状態と行動の因果度の遷移を Figure 3 に示す。Figure 3 において横軸はステップであり、縦軸は対数表示した因果

度である．インタラクションの回数が少ない間は各組合せ内の確率分布が正確でないため、どの組合せにおいても因果度が過剰に推定されている．しかし、回数が増えるにつれ、 $TE_{head,face,object}$ 、つまり  $I_{object}^R, S_{face}^R, A_{head}^R$  という組合せについての因果度が最大となる (Figure 3, 青色の線)．この組合せは 3.2 節で述べた随伴性学習により共同注意が獲得可能な組合せであり、移動エントロピーを計算することにより共同注意を学習するために必要な因果的な変数の組合せを発見することができるといえる．

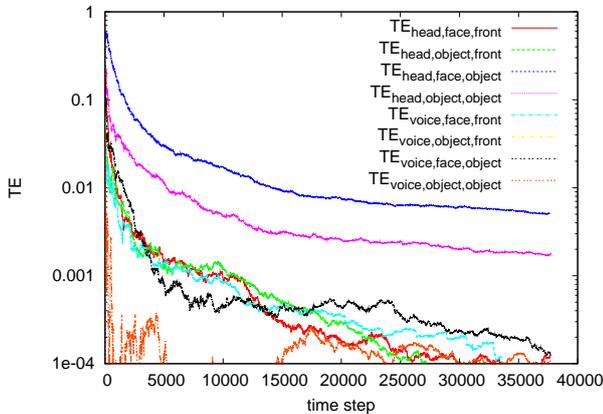


Fig.3 The time courses of causal measure about pairs of variables in face-to-face interactions between a caregiver and a robot.

この発見された因果的な変数の組合せ、すなわち対象物への選好性、養育者の顔の状態、および視線切替え行動を用いて共同注意学習が可能であることを確認する．そのためにインタラクション中の対象物が見れたとき ( $I_{object}^R = 1$ ) における顔の状態と視線切替え行動についての頻度分布を調べた．

Figure 4 はその頻度分布から  $S_{face}^R$  の各要素についての  $A_{head}^R$  の平均値を求め、それを  $A_{head}^R$  の各要素から引いた値の分布である． $S_{face}^R \neq 0$  のときをみると、 $S_{face}^R = A_{head}^R = k$  ( $k \neq 0$ ) の組合せを選択したときにその他の組合せに比べて対象物を見ることができた頻度が高い．これらの組合せは共同注意を行うことのできる組合せである．このような偏りが存在する場合、Nagai *et al.* の随伴性学習 [4] を用いれば、ロボットに共同注意を獲得させることが可能であると考えられるため、ロボットは共同注意を獲得可能な変数の組合せを発見しているといえる．

この図において、 $S_{face}^R = 0$  のときは養育者がロボットを見ている状態を指すため、ロボットは養育者と共同注意を行うことができない．そのため、どの行動も対象物注視に対して因果関係がなく、全体的に低い頻度となっている．

Figure 3 において 2 番目に因果度が大きい組合せは  $TE_{head,object,object}$  (ピンク色の線) であるが、これは本実験における環境の解像度に対する対象物の数やインタラクション経験によって完全に確率分布を推定できないことに起因した因果関係が移動エントロピーによって抽出されたと考えられる．

実際に移動エントロピーの高い組合せにて共同注意が学習可能であることを示すために簡単な学習実験を行った．学習には養育者の顔の向き  $S_{face}^R$  の各要素に対応するノードを入力とし、自身の視線切替え  $A_{head}^R$  の各要素に対応するノードを出力とした 2 層のニューラルネットワークを用いた．実験は 10 試行行い、それぞれインタラクションの

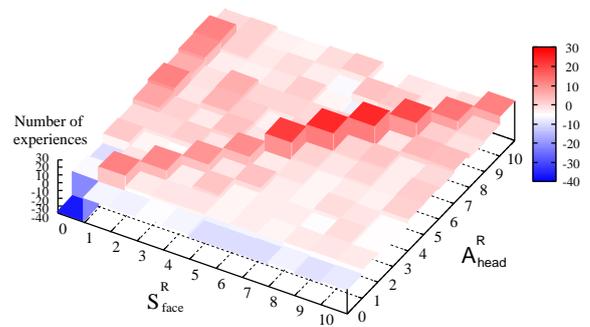


Fig.4 Distribution of experiences to  $I_{object}^R = 1$  in interactions between a caregiver and a robot.

間に実際に経験した顔から対象物への視線切替えにおける状態と行動の要素に対応するノードを 1 とし、それ以外を 0 としてバックプロパゲーション法にて重みの更新を行った．インタラクション終了時にネットワークが顔の向きの各要素に対して共同注意を可能にする行動を選択した数を調べた．その結果 10 試行のインタラクション終了時で平均 8.7 個の状態が共同注意を達成する行動と結び付いており、移動エントロピーによって発見した組合せで共同注意の学習が可能であることを支持する結果となった．

## 6 結論

本研究では自身の選好性に対する状態変数と行動変数の組合せの移動エントロピーを計算することにより共同注意を獲得するために必要な因果関係の存在する組合せを発見できることを示した．

今後はさらに養育者、ロボット両モデルの行動やそれに対する応答を実際のインタラクションにより近い場面において同様の結果を得られるかを調査する．また、対面インタラクションにおいて考えられる行動、状態、選好性を増やし、因果度を測ることから指さしといった共同注意行動に関係の深いコミュニケーション行動を獲得するための組合せを発見することができるかを確認する予定である．

## 参考文献

- [1] C. Moore and P.J. Dunham, editors. ジョイント・アテンション 心の起源とその発達を探る. Lawrence Erlbaum Associates, 1999. 大神英裕 監訳.
- [2] Michita Imai, Tetuo Ono, and Hiroshi Ishiguro. Physical relation and expression: Joint attention for human-robot interaction. In *In Proceedings of 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 2001.
- [3] Minoru Asada and Yasuo Kuniyoshi Karl F. MacDorman, Hiroshi Ishiguro. Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 37, No. 37, pp. 185–193, 2001.
- [4] Y. Nagai, K. Hosoda, A. Morita, and A. M. Asada. constructive model for the development of joint attention. *Connection Science*, Vol. 15, No. 4, pp. 211–229, Dec. 2003.
- [5] Jochen Triesch, Christof Teuscher, Gedeon O. Deák, and Eric Carlson. Gaze following: why (not) learn it? *Developmental Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 125–157, 2006.
- [6] T Schreiber. Measuring information transfer. *Physical Review Letters*, Vol. 85, No. 2, pp. 461–464, 2000.
- [7] J.Gavin Bremner 著, 渡部雅之訳. 乳児の発達. ミネルヴァ書房, 1999.
- [8] Olaf Sporns and Max Lungarella. Mapping causal relations in sensorimotor networks. In *Proceedings the 5th International Workshop on Epigenetic Robotics*, 2006.